

# DESCRIPCION Y ALGUNOS CALCULOS DE LA TORRE DE LANZAMIENTO DEL "SKYLARK" EN KIRUNA (SUECIA)

Por Carlos SANCHEZ TARIFA  
Dr. Ingeniero Aeronáutico,

## 1. Introducción.

Recientemente ha sido inaugurada con pleno éxito una torre de lanzamiento del "Skylark", que la Organización Europea de Investigación del Espacio (ESRO) ha instalado en el ESRANGE o campo de lanzamiento de dicha organización situado en las cercanías de Kiruna (Suecia).

La inauguración consistió en el lanzamiento de un cohete de sondeo "Skylark" provisto de una carga científica destinada al estudio de las auroras boreales. El cohete cayó en el punto previsto y el funcionamiento de todos los elementos del sistema de lanzamiento fue totalmente correcto.

Este sistema de lanzamiento ha sido proyectado y construido por la empresa española Sener. De este primer lanzamiento y de la construcción de la torre por Sener ha dado amplia noticia la prensa española, algunas veces con las exageraciones que podrían esperarse en una noticia de esta clase.

En el mes de abril de 1966 ESRO estableció un concurso para el proyecto, construcción y erección del sistema de lanzamiento del "Skylark". A este concurso se presentaron once propuestas de las principales firmas aeroespaciales europeas. Mediante la evaluación técnica de estas propuestas se seleccionaron tres de ellas como finalistas; entre las que se encontraba la de Sener, junto con la de una importante compañía inglesa y otra francesa. La decisión final fue en favor de Sener.

La organización ESRO ya disponía del ESRANGE, pero solamente contaba con sistemas de

lanzamiento para cohetes de sondeo tipos "Nike-Apache" y "Centaurus", mientras que los cohetes de mayor tamaño "Skylark" los venía lanzando en el campo italiano de Salto di Quirra, en la isla de Cerdeña.

La elección del emplazamiento del ESRANGE en la Laponia sueca, situado por encima del Círculo Polar Ártico (fig. 1) fue debido a que es uno de los pocos sitios de Europa con una extensión de terreno, prácticamente deshabitada, de tamaño suficiente para permitir la recogida en tierra de cohetes y cargas útiles de vehículos tales como el "Skylark". Otra importante razón fue el deseo de estudiar fenómenos boreales.

No obstante, la extensión del campo de lanzamiento es pequeña y el campo está limitado al Norte por Noruega y Finlandia, países no pertenecientes a ESRO. La extensión de este campo es apenas suficiente para el lanzamiento de cohetes a grandes alturas de sondeo, como el "Skylark" que puede alcanzar hasta 300 Km. Por esta razón, las especificaciones de ESRO imponían una precisión extrema en los lanzamientos, fijándose en el proyecto un error máximo en el ángulo de lanzamiento de diez minutos, en el que se incluían todas las causas posibles de error.

Este valor de diez minutos es por completo inusitado, ya que es frecuente permitir desviaciones de 1 ó 2 grados de error en el ángulo de lanzamiento.

Otra característica especial del proyecto fue la de estar situado el ESRANGE en un clima ártico.

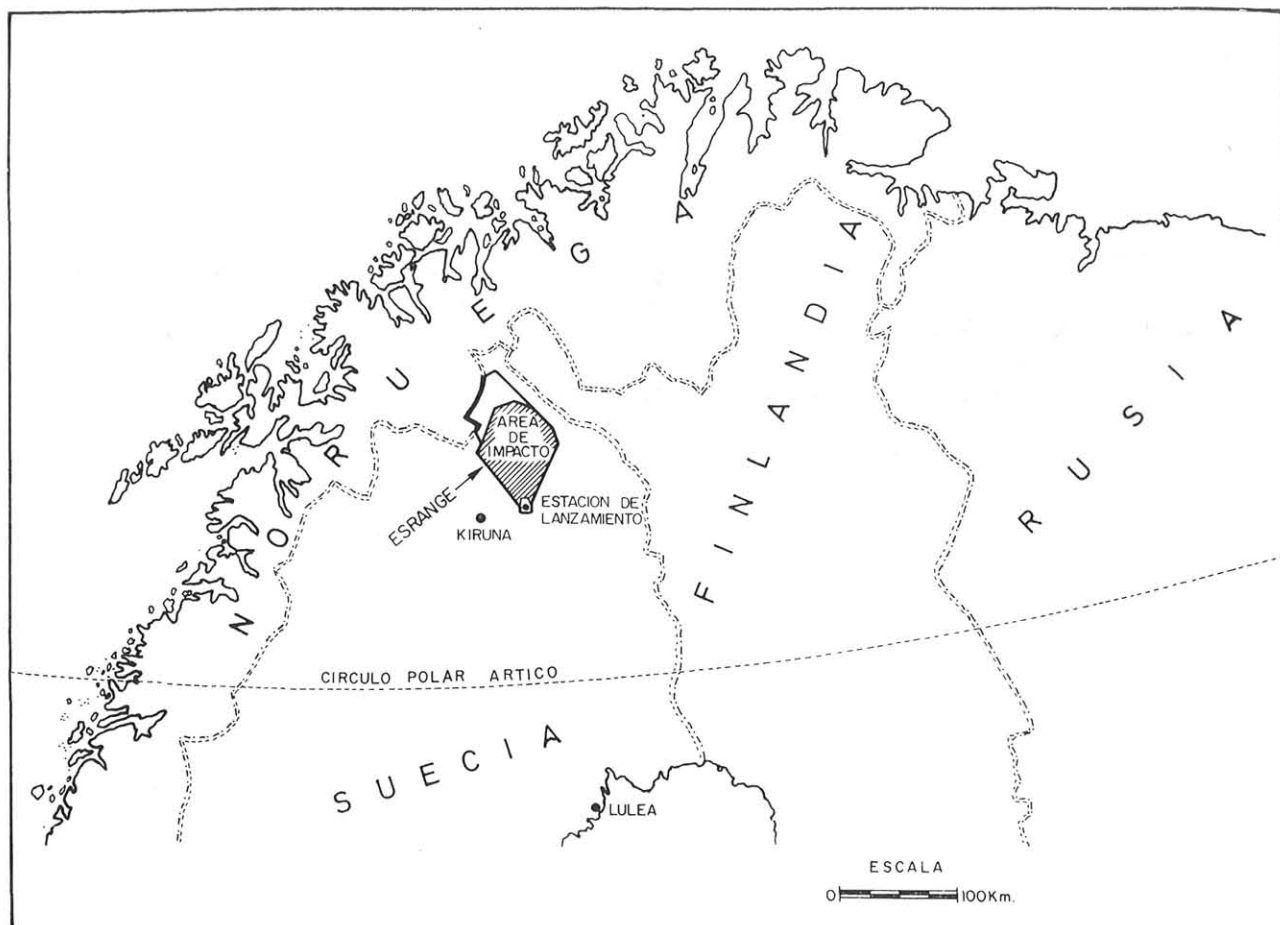


Fig. 1. — Situación del ESRANGE.

lo que obligó a que la torre estuviera totalmente revestida y que, por tanto, hubiesen de efectuarse los disparos desde el interior de una estructura cerrada, con las dificultades que esto implica de que el revestimiento resista la presión de los gases durante el disparo.

Otras particularidades del proyecto fueron el que la torre tuviese que calcularse para vientos de hasta 150 Km./h. y que el mando y lectura de movimiento azimutales y de elevación de la torre se efectuasen con una gran precisión y desde un punto de control situado a unos 200 metros de la misma. Finalmente, la torre había de estar climatizada en humedad y temperatura, debiendo mantenerse temperaturas de 15° C. en su interior, aunque en el exterior existiesen temperaturas de 40 ó 50° C. bajo cero.

## 2. Descripción de la torre.

La torre de lanzamiento ha sido diseñada y construida para el cohete de sondeo "Skylark". Este cohete lo construye la British Aircraft Corporation. Tiene unos 8 metros de longitud y es capaz de alcanzar alturas de hasta 300 Km. y de llevar cargas científicas de más de 200 Kg. de peso (figura 2).

El "Skylark" es impulsado por un motor cohete principal, El Raven, de 4.500 a 5.500 kilogramos de empuje según sus diferentes versiones y un impulso o "booster" el "Cuckoo", de unos 8.000 Kg. de empuje.

La aceleración inicial del "Skylark" es muy baja, tratándose de un vehículo de sondeo, algo

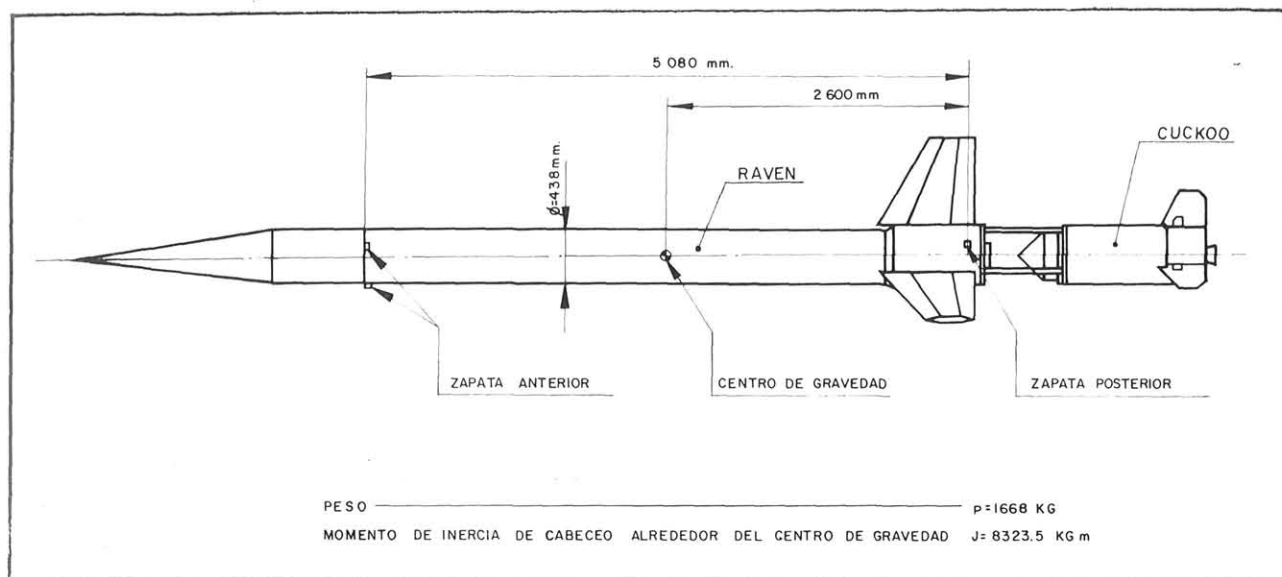


Fig. 2. — Esquema del "Skylark".

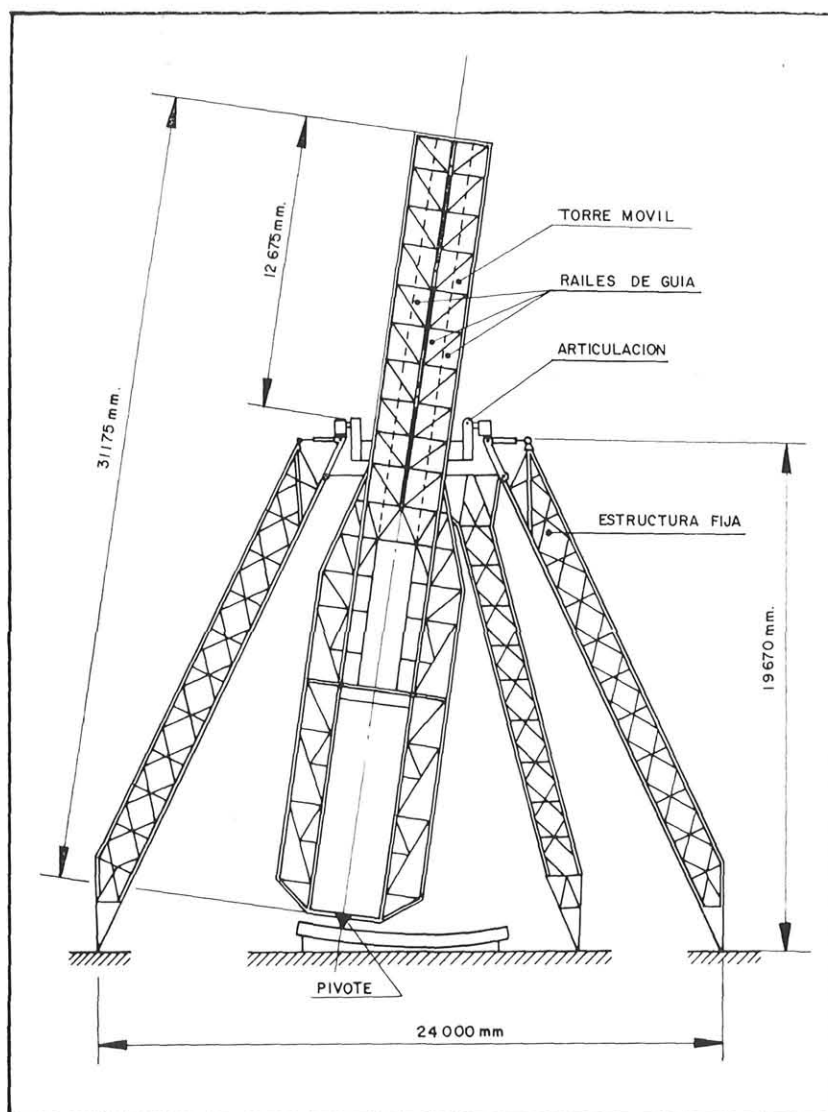


Fig. 3. — Esquema de la estructura de la torre.

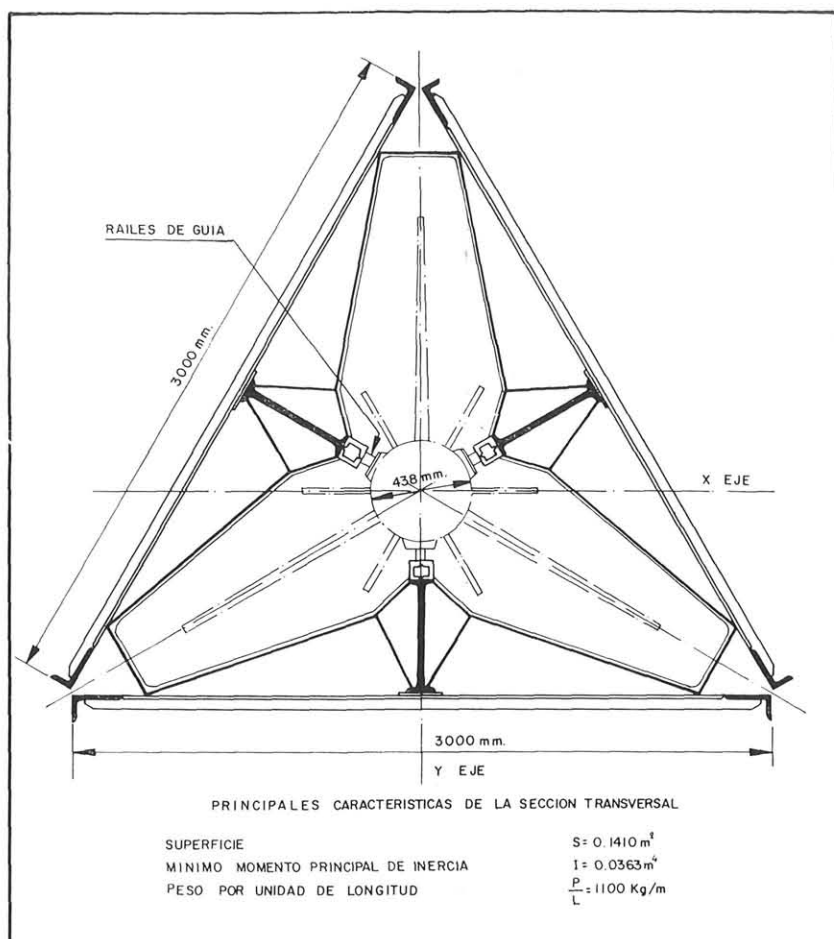


Fig. 4.— Sección transversal de la estructura móvil.

inferior a 4 g. Ello obliga a que la torre de lanzamiento tenga una longitud desusada (de unos 30 metros), con objeto de que el cohete alcance una velocidad suficiente antes de salir de los carriles de guiado.

La torre fue proyectada atendiendo a que tuviese una extraordinaria rigidez. Su estructura (figura 3) consta de una parte fija y de una parte móvil. La parte móvil es una estructura de sección triangular de unos 30 metros de longitud y 12 metros de anchura que soporta los tres raíles de guiado por los que se desliza el cohete (fig. 4). Estos raíles pueden ajustarse radial y lateralmente. La alineación se lleva a cabo con un equipo óptico, llegándose a precisiones de 0,01 mm.

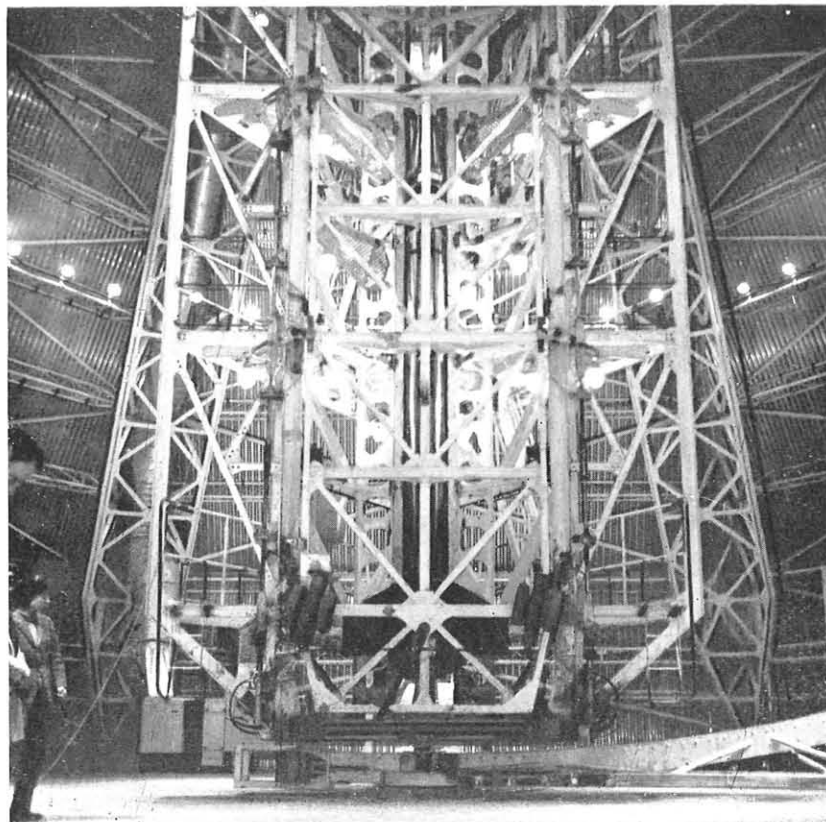
La estructura móvil se une por su parte central y mediante una articulación cardán a una estructura fija de planta hexagonal, con una parte central y seis patas que se articulan sobre la fundación de hormigón.

La parte inferior de la estructura móvil va reforzada. En ella se ajusta y forma parte de la estructura el carro portador del "Skylark". En su parte inferior va provista de un pivote mediante el cual se comunican los movimientos de azimut y elevación de la torre. La configuración de la torre le asegura una gran rigidez, y el sistema de movimiento permite una gran precisión en la posición de la misma. La forma hexagonal permite una utilización máxima del espacio (figs. 3 y 5).

Sobre la estructura principal va superpuesta una estructura secundaria destinada a soportar elementos "sandwich" de aluminio y fibra de vidrio que forman el revestimiento exterior de la torre.

La parte superior de la estructura móvil también es cerrada, pero en este caso el recubrimiento de aluminio y fibra de vidrio no es suficiente para resistir la presión de los gases durante el paso del cohete, por lo cual la estructura triangular va revestida de una chapa cilíndrica de acero de 3 milí-

Fig. 5.— Fotografía de la parte inferior de la torre. El "Skylark" se encuentra colocado en situación de disparo.



metros de espesor destinada a soportar la presión de los gases, y sobre esta chapa se dispone el aislamiento térmico de aluminio y chapa de vidrio.

Entre la estructura fija y la móvil en la zona de la articulación cardán se dispone un fuelle de neopreno que sirve de aislamiento y permite el movimiento relativo entre las estructuras fija y móvil.

En la parte inferior de la torre existen dos compuertas de gran tamaño que se levantan mediante un mecanismo eléctrico para permitir la salida de los gases durante el lanzamiento del cohete. Existe también una puerta de emergencia y en la parte superior de la estructura se disponen unas compuertas en forma de pétalos que se abren para dar paso al cohete.

La torre lleva nueve plataformas interiores de servicio, cada una de ellas provista de tres trampas abatibles para permitir el paso del cohete, contando también la torre con cinco plataformas exteriores.

En la figura 4 se muestra una fotografía de la parte inferior de la torre en la que puede verse un cohete "Skylark" situado en posición de disparo.

### 3. Mecanismos e instalación eléctrica.

Los movimientos azimutal y de elevación de la torre que permiten apuntarla hacia cualquier dirección dentro de un cono de  $15^\circ$  C. de semi-ángulo contado a partir de la vertical, se efectúan a través del pivote inferior de la estructura móvil.

El movimiento de elevación de la torre se efectúa moviendo el pivote en dirección radial mediante un carro arrastrado por una cadena sin fin. La cadena se pone en movimiento por dos piñones accionados por un grupo motor-reductor.

Todo este equipo va alojado en un puente de 7 metros de longitud que descansa en uno de sus extremos sobre un rodamiento axial anclado en el punto central del pavimento de la torre y con el otro extremo sobre una viga dotada de dos ruedas de traslación, que se mueven sobre una vía curva de 15 m. de diámetro.

El giro de este puente proporciona el movimiento azimutal de la torre. Este movimiento de giro se consigue con un grupo motor-reductor que acciona un piñón que ataca una corona de linterna fijada al carril sobre el cual se traslada el puente.

La indicación de los ángulos de elevación y azimut se efectúa a distancia mediante dos sistemas Selsyn. Los errores de posición y de indicación en conjunto son inferiores a 0,1°, de acuerdo con la precisión exigida en la especificación del proyecto.

La instalación eléctrica es de una gran complejidad, comprendiendo el mando de todos los mecanismos de movimiento, polipastos, compuertas, etc., el de todas las señalizaciones de seguridad, que en una instalación de esta clase son de gran importancia, el mando del extractor de las conexiones de la carga útil y la señalización y mando de disparo del cohete. Asimismo, también es eléctrica la instalación de climatización de la torre, para la que se necesita una potencia del orden de los 250 kW.

#### CÁLCULOS.

El proyecto de la torre comprendió los cálculos estáticos y dinámicos de la estructura, mecanismos, instalación eléctrica, climatización, presiones de los gases del cohete sobre el revestimiento, etcétera, etc.

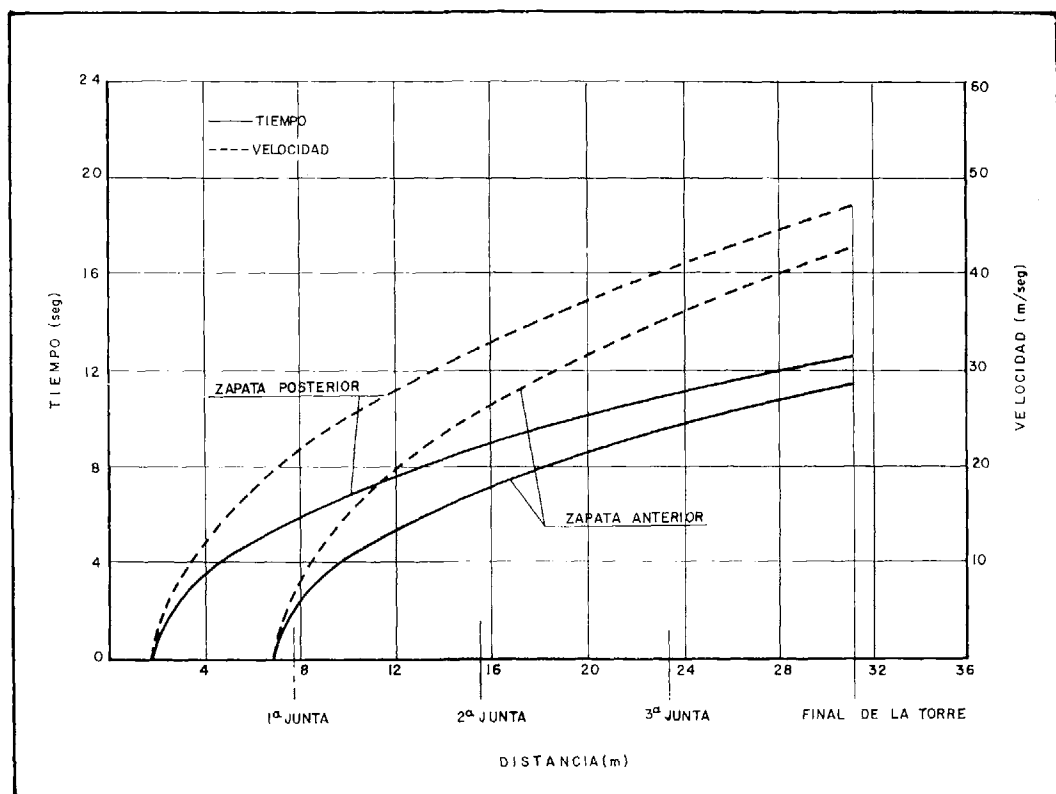
Por su especial interés aeronáutico haremos una referencia particular al estudio dinámico de la torre, que comprendió las vibraciones inducidas en la misma durante el lanzamiento del cohete y el de los errores de lanzamiento originados por estas vibraciones. Estos errores de lanzamiento pueden ser de dos clases:

1. Errores de apunte debidos a una posible distorsión dinámica de la estructura en el momento en que el cohete sale de la torre.

2. Errores de salida o errores "tip-off". Estos errores "tip-off" se producen en el intervalo de tiempo que existe entre el momento en que la zapata delantera abandona la estructura y el instante en que la zapata posterior termina de deslizarse sobre los raíles, abandonando el cohete totalmente la estructura.

Estos errores siempre existen cuando el cohete no se lanza en posición vertical a causa de la aceleración de la gravedad, y pueden aumentar considerablemente a causa de vibraciones de la estructura, independientemente de que el cohete sea lanzado en posición vertical o con cualquier otro ángulo.

Fig. 6. — Movimiento longitudinal del "Skylark" sobre la estructura. (Utilizando el "Cuckoo".)



Los errores "tip-off" introducen modificaciones en la actitud o ángulo de apunte del cohete, una componente tangencial de la velocidad y una rotación alrededor del centro de gravedad.

Las vibraciones de la estructura se originan por el efecto de carga móvil que produce el cohete al desplazarse sobre los raíles y a causa de los impactos de las zapatas del cohete al pasar por las juntas de los raíles.

Las vibraciones se calcularon para la parte móvil de la estructura, supuesta articulada en el cardán y en el pivote inferior. Se consideró la estructura como una viga continua, no teniéndose en cuenta los efectos producidos por la inercia de rotación de la misma ni por las fuerzas cortantes.

En primer lugar se determinaron las frecuencias naturales y los modos de vibración de la estructura con la ayuda de un calculador digital. Los cálculos de vibración debidos a los efectos de carga

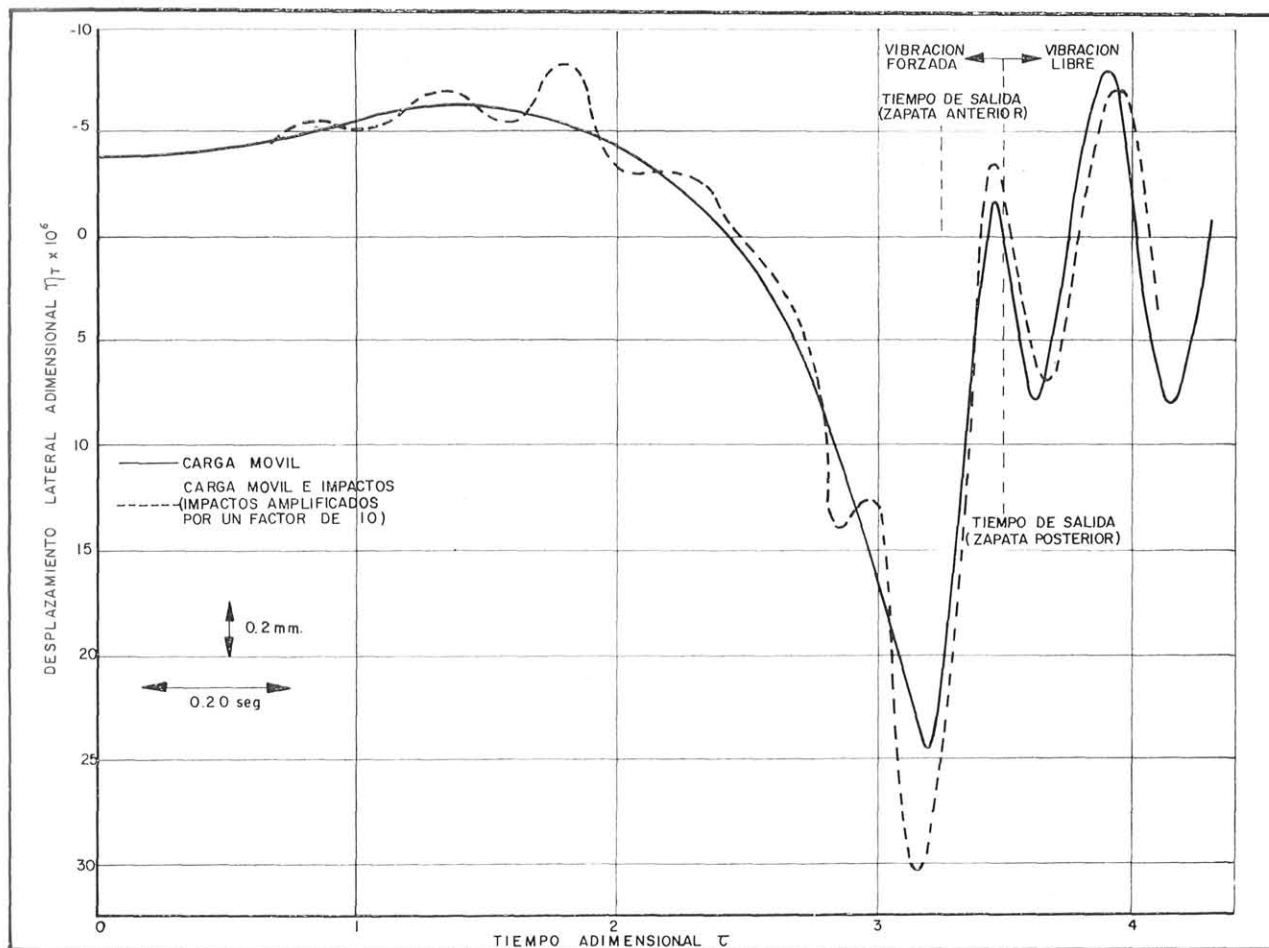
móvil se efectuaron, no considerándose ninguna clase de amortiguación y no teniéndose en cuenta efectos aerodinámicos en el cohete ni la fricción de sus zapatas sobre la estructura.

Se supuso también para este cálculo que el "Skylark" y sus zapatas tenían una rigidez infinita y que el movimiento de rotación del cohete era pequeño. Tampoco se tuvo en cuenta el efecto de la curvatura de la estructura en el movimiento del cohete.

El cálculo de estas vibraciones se llevó a cabo siguiendo un método desarrollado por Fretwell, en la Universidad de Illinois (ref. 2), pero modificado en forma apropiada para el caso del "Skylark".

A estas vibraciones se superpusieron las debidas a impactos, desarrollando un método de cálculo basado en la teoría de perturbaciones (refs. 1 y 3). Se consideró la rigidez local del cohete en la zona de las zapatas, de acuerdo con los datos su-

Fig. 7. — Vibraciones debidas a efecto de la carga móvil y debidas a impactos. Primer modo. (Utilizando el "Cuckoo".)



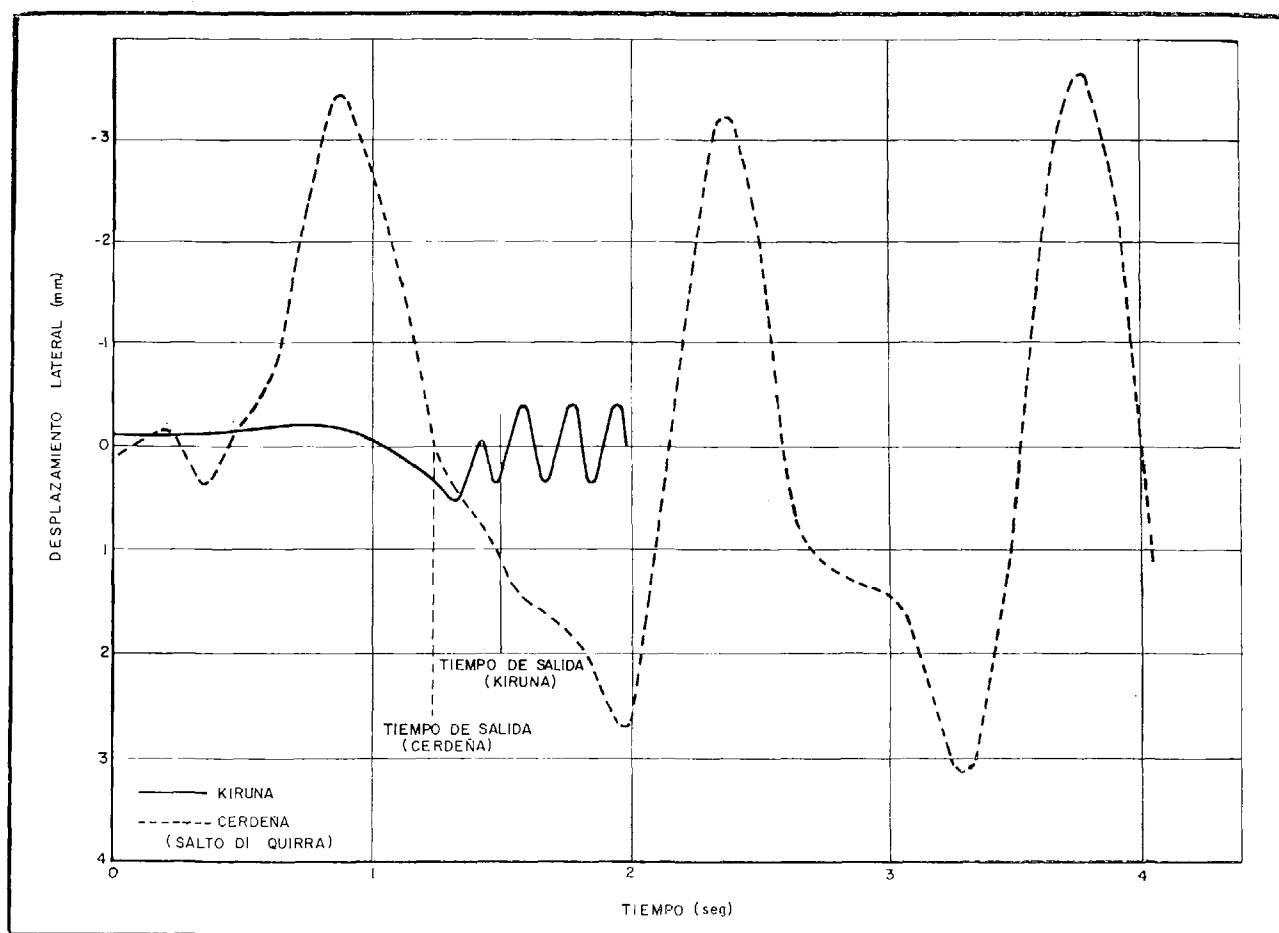


Fig. 8. — Comparación de las vibraciones producidas por el "Skylark" en la torre de Kiruna y en la de Salto di Quirra.

ministrados por la British Aircraft Corporation, y se supuso que los raíles tenían una masa y rigidez infinitas en comparación con las del cohete.

En la figura 6 se muestran los datos de la velocidad del cohete a lo largo de la estructura, así como la posición de las juntas de los carriles, para los que las especificaciones exigían un escalón inferior a los 0,05 mm. En la figura 7 se muestra un ejemplo de los resultados de los cálculos para el primer modo y cuando se emplea el Cuckoo (para el "Raven" VI se obtuvieron resultados análogos). Puede observarse que las amplitudes de las vibraciones son muy pequeñas y que las originadas por impacto son por completo despreciables.

Finalmente, se efectuaron los cálculos del movimiento del cohete en la zona de salida de la torre, bajo el efecto combinado de la gravedad y de las vibraciones. Los resultados obtenidos, calculados para ambos casos de utilización del "Raven" VI y del Cuckoo, se muestran en el cuadro adjunto.

Puede verse que los errores de lanzamiento originados por vibraciones son muy pequeños comparados con los errores que inevitablemente se producen a causa de la gravedad.

En la figura 8 se comparan las vibraciones de la torre de lanzamiento de Kiruna, con las de Salto di Quirra, ambas para el "Skylark", comprobándose la mucha mayor rigidez de la torre del ES-RANGE.

Todos estos cálculos se incluyeron en un Report (ref. 1), que fue entregado a ESRO y al Gobierno sueco.

La conclusión final fue que la torre de lanzamiento diseñada por Sener era extremadamente rígida y que bajo todos los posibles casos el error de lanzamiento (medido en ángulo de actitud) imputables a la torre eran del orden de un minuto, es decir, la décima parte del valor máximo previsto en las especificaciones ESRO del proyecto.



Comparación de errores de "tip-off" causados por vibraciones y por gravedad.

(Ángulo de lanzamiento: 75°.)

	Posición (Ángulo inclinación) minutos	Velocidad rotación (Velocidad cabezada) mm./sg.	Desplazamiento lateral del C. G. mm.	Velocidad lateral del C. G. mm./sg.
"Tip-off" debido a la gravedad "Raven" VI) .....	18	291	11	170
"Tip-off" debido a la gravedad (Cuckoo) .....	7	125	4	73
"Tip-off" debido a la vibración ("Raven" VI) .....	0,9	4,5	0,63	6,5
"Tip-off" debido a la vibración (Cuckoo) .....	1,1	0,24	0,65	6,5

Referencias.

1. SÁNCHEZ TARIFA, C.; BOLLAIN, J. A., y VELASCO, T.: *Vibrations of the Skylark Launching Tower of Kiruna and Study of the Attitude and Motion of the Skylark Vehicle at the Moment of Leaving the Structure*. Sener, S. A. Report para ESRO, julio 1967.
2. FRETWELL, C. C.: *Analysis of Missile Launchers*. Part I: *A Two Point Mass Moving on a Flexible Beam*. University of Illinois, Urbana, Illinois, March 1962.
3. HARRIS, C. M., and CREDE, C. E.: *Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill Book. New York, 1961.
4. HART, H. H.: *Vibration Studies on a Launching Tower in Sardinia*. Institute T.N.O. for Mechanical Constructions. Delft, 1965.

